



EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Stella Ploom

**ARDUINOL PÕHINEV ÕPPEVAHEND
OPERATSIOONIVÕIMENDITE UURIMISEKS**

***ARDUINO BASED DEVICE FOR STUDYING OPERATIONAL
AMPLIFIER***

Bakalaureusetöö

Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: lektor Heino Pihlap

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Stella Ploom		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Arduinol põhinev õppevahend operatsioonivõimendite uurimiseks			
Lehekülgi: 44	Jooniseid: 31	Tabeleid: 0	Lisasid: 2
<p>Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika</p> <p>4.17. Energeetikaalased uuringud</p> <p>T140 Energeetika</p> <p>Juhendaja(d): Heino Pihlap</p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2021</p>			
<p>Käesolev bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida Arduinol põhinev operatsioonivõimendi katseseade, millega anda ülevaade operatsioonivõimendist ning tema tuntumatest lülitusviisidest nagu komparaator, pingejärgija, mitteinverteeriv võimendi ja <i>Schmidti trigger</i>.</p> <p>Eesmärgini jõudmiseks on seatud ülesanded, mis on lahendatud neljas osas: operatsioonivõimendite kirjeldus; koostatava õppevahendi kasutajaliides ning kasutatavad seadmed; Arduino IDE-l põhinev programmeerimine ning katseseadme projekteerimine; näidisülesanded tuntumatest operatsioonivõimendite lülitustest.</p> <p>Autor saavutas kõik seatud ülesanded ning töö raames valmis Arduinol põhinev õppevahend operatsioonivõimendite uurimiseks.</p>			
Märksõnad: operatsioonivõimendi, õppevahend			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's / Bachelor's / Thesis	
Author: Stella Ploom		Speciality: Engineering	
Title: Arduino Based Device for Studying Operational Amplifier			
Pages: 44	Figures: 31	Tables: 0	Appendixes: 2
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research T140 Energy research Supervisors: Heino Pihlap Place and date: Tartu, 2021			
The goal of this bachelor thesis is to construct an Arduino based operational amplifier test device. Which is then used to give an overview of the operational amplifier and its best known comparator, voltage follower, non-inverting amplifier, Schmidt trigger. There have been set a series of tasks that have been completed in four parts: The description of the operational amplifiers; interface of the learning tool and usable instruments; Arduino IDE-1 based programming and test device design; sample tasks of the best known operational amplifier circuits. The author achieved all of the goals that had been set and an Arduino based learning tool for operational amplifiers was created during the work on this thesis.			
Keywords: operationial amplifier, learning tool			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. OPERATSIOONIVÕIMENDID	6
1.1. Operatsioonivõimendi olemus	6
1.2. Tagasiside kasutamine operatsioonivõimendil	8
1.2.1. Negatiivse tagasisidega operatsioonivõimendi.....	8
1.2.2. Positiivse tagasisidega operatsioonivõimendi	9
2. KATSESEADME DISAIN	13
2.1. Katseseadme kasutajaliides.....	13
2.2. Arduino IDE	14
2.3. Seadmed.....	14
3. KATSESEADME EHITUS.....	18
3.1. Programmeerimine.....	18
3.2. Projekteerimine ja 3D printimine	18
3.3. Katseseadme komplekteerimine	24
4. KATSESEADME KASUTUSVÕIMALUSED	28
4.1. Katseseadme kasutusskeem	28
4.2. Komparaator	29
4.3. Pingejärgija	30
4.4. Mitteinverteeriv võimendi	32
4.5. Schmidti trigger	34
KOKKUVÕTE	36
KASUTATUD ALLIKAD	37
LISAD	38
Lisa 1. Arduino Geekreit Uno arendusplaadi pinout.....	39
Lisa 2. Arduino IDE-ga koostatud programmeerimiskood.	40
LIHTLITSENTS.....	44

SISSEJUHATUS

Käesolev bakalaureusetöö on koostatud teemal „Arduinol põhinev õppevahend operatsioonivõimendi uurimiseks“. Antud töö eesmärgiks on projekteerida Arduinol põhinev operatsioonivõimendi katseseade, millega anda ülevaade operatsioonivõimendist ning tema tuntumatest lülitusviisidest. Töö saavutamiseks on ülesanded lahendatud neljas osas. Esimeses kirjeldatakse operatsioonivõimendite tööd üldiselt, seejärel räägitakse ka spetsiifilisemalt tagasisidega operatsioonivõimenditest, mil viisil neid üldjuhul kasutatakse. Teises osas räägib töö autor õppevahendi kasutajaliidesest, mida peab suutma seade teha ning milliseid seadmeid lahenduse saavutamiseks kasutatakse. Kolmandas etapis käsitletakse Arduino IDE-l põhinevat programmeerimist, projekti loomist vastavalt seadme otstarbest, 3D printimist ning seadme täielikku valmimist. Neljandas osas käsitletakse mõningaid näidislahendusi tuntumate operatsioonivõimendite lülituste näitel.

Antud lõputöö teema on aktuaalne just akadeemilisel eesmärgil ehk loodud seadme abil saab edaspidi tutvustada õpilastele, mis on operatsioonivõimendi, kuidas see töötab, milliseid erinevaid lülitusi saab operatsioonivõimendiga luua ning mis on nende eripärad. Õpetusliku eesmärgi kaalutlustel on antud töös käsitletud operatsioonivõimendit ideaalsel kujul.

Antud bakalaureusetöö on valitud arendamaks energiakasutuse üliõpilaste teadmisi operatsioonivõimenditest, lihtsustamaks nende õpet vastavalt loodava katseseadme abil ning täiustamaks teadmisi operatsioonivõimenditest, mida kasutatakse paljudes elektroonikaseadmes ilma, et inimesed seda teaks.

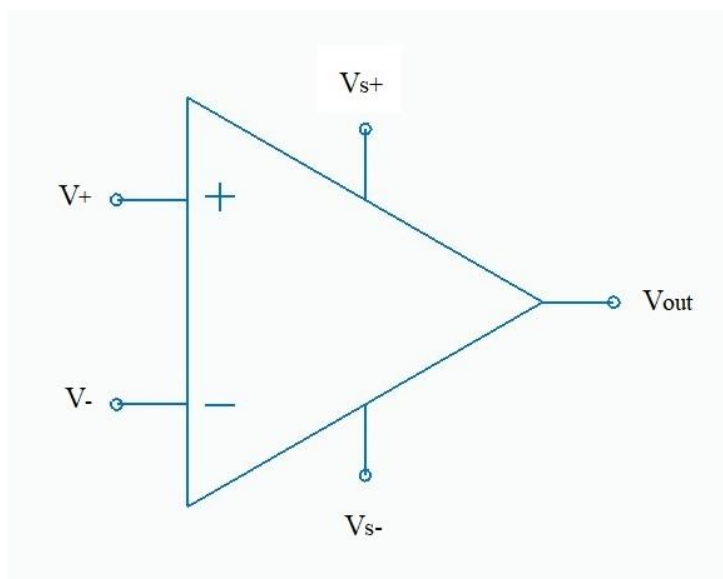
Töö koostamisel on kasutatud Microsoft Office Word tekstiredaktorit, Arduino IDE-d ja Solid Edge 2020 joonestusprogrammi. Kasutatavate andmete alusel on teostatud vastavate seadmete ja materjalide valik katseseadme koostamiseks.

Autor tänab oma juhendajat Heino Pihlapit abi ja nõuannete eest.

1. OPERATSIOONIVÕIMENDID

1.1. Operatsioonivõimendi olemus

Operatsioonivõimendi ehk OV on lineaarne seade, millel on kaks sisendit, kaks toitesisendit ning üks väljund, selle abil võimendatakse sisendpingete vahet. Operatsioonivõimendi sisendite ja väljundi skeem on näha joonisel 1.1. OV on mõeldud koos väliste komponentidega, nagu takistid ja kondensaatorid kasutamiseks, tagasiside komponendid on need, mis määravad ära, millisel funktsioonil OV töötab. Opvõimendi on loodud erinevate lülituste tegemiseks vähete väliskomponentide lisamisega ehk operatsioonivõimendi on analoogsignaale töötlev integraallülitusseade. Tänu integraallülituse omadustele kasutatakse operatsioonivõimendeid tihti just matemaatilistel kalkulaatoritel liitmiseks, lahutamiseks, integreerimiseks ja diferentseerimiseks. [1]



Joonis 1.1. Operatsioonivõimendi sisendid ja väljundid.

, kus:

V_+ - mitteinverteeriv sisend

V_- - inverteeriv sisend

V_{s+} - positiivne toitesisend

V_{s-} - negatiivne toitesisend

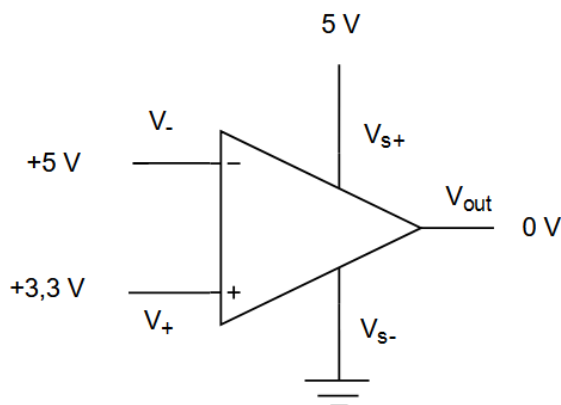
V_{out} – väljundpinge

Operatsioonivõimendi võimendab sisendpingete vahet: pinge tema väljundis on võrdne pingete V_+ ja V_- vahe ning võimendusteguri korrutisega. [2:38]

$$V_{out} = (V_+ - V_-) \cdot K, \quad (1.1.)$$

kus K on võimendustegur.

Kõige lihtsam operatsioonivõimendi on tagasisideta operatsioonivõimendi, mida kutsutakse komparaatoriks. Komparaator, mida on näha joonisel 1.2., võrdleb positiivse V_+ ja negatiivse V_- sisendi suurust, määrab, kumb on neist suurem ning annab väljundisse vastavalt, kas siis negatiivse toitesisendi väärtuse V_{s-} või positiivse toitesisendi väärtuse V_{s+} . Teisisõnu kui V_- on suurem kui V_+ , siis annab komparaatori lülitus väljundisse V_{s-} väärtuse, kuid kui V_+ omab suuremat väärtust kui V_- , siis antakse väljundisse V_{s+} väärtus. Ideaalsel juhul annab OV välja suurima võimaliku väljundpinge, mis kõigi OV-de puhul ei ole maksimaalne võimalik pingeväärtus. See oleneb juba vastavalt operatsioonivõimendist ning täpsemad andmed saab iga operatsioonivõimendi suurimast väljundpinge võimalusest selle OV seadmelehel. [1]



Joonis 1.2 Komparaatori skeem.

Lineaarses operatsioonivõimendis on väljundsignaal võimendustegur, mida nimetatakse ka võimendite võimenduseks korrutatuna sisendsignaali väärtusega. Sõltuvalt sisend- ja väljundsignaali olemusest on olemas neli erinevat (pinge, voolu, ülekonduktsioon ja

üleresistentne) võimendusteguriga võimendit. Operatsioonivõimendi võimendusteguri muutmiseks tuleb kasutada tagasisidet, mille korral suunatakse osa väljundsignaalist vastavalt kas inverteerivasse või mitteinverteerivasse sisendisse. [1]

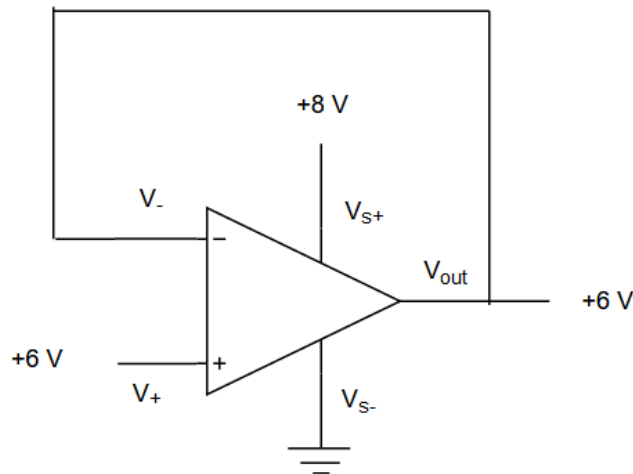
1.2. Tagasiside kasutamine operatsioonivõimendil

1.2.1. Negatiivse tagasisidega operatsioonivõimendi

Tagasisideta operatsioonivõimendi võimendus võib muutuda väga suureks, mis tähendab, et seade on väga ebastabiilne. Osa võimendusest saab kaotada, ühendades väljund otse või voolutugevuse piiramiseks läbi sobiliku takisti inverteerivasse sisendisse ehk kasutatakse negatiivset tagasisidet. Võimendatav signaal antakse inverteerivasse või mitteinverteerivasse sisendisse. Sel juhul võimendusastme võimendus väheneb, sest signaal kahe sisendi vahel muutub väiksemaks, kuid kontroll operatsioonivõimendi üle suureneb ehk on võimalus luua stabiilsem operatsioonivõimendi lülitus. [1]

Tagasiside kasutamine on oluline, et omandada stabiilne võimendustegur, kõrge sageduskarakteristik ning madal moonutus. Täpsemalt kasutatakse nende juures negatiivset tagasisidet, sest mida kõrgem on antud tagasiside pinge, seda madalam saab olla pingevõimendustegur ning seda kõrgam saab olla sageduskarakteristik. [3:71]

Operatsioonivõimendit, kus negatiivse tagasisidega on väljundsignaal toodud otse inverteerivale sisendile nimetatakse pingejärgijaks (ing k *voltage follower*), sest võimaldab luua fikseeritud võimendusteguri ehk V_{out} on võrdne sisendpingega V_{in} . [1] Pingejärgijat on näha joonisel 1.3.



Joonis 1.3 Ideaalse operatsioonivõimendiga pingeljõhija skeem.

Ideaalse operatsioonivõimendi pingeljõhija skeemi joonisel on välja toodud, et operatsioonivõimendi positiivne toitesisend on +8 V, mitteinvertiiv sisend on +6 V, kuid kunas tegemist on pingeljõhijaga, siis vastavalt reeglile, et $V_{out}=V_{in}$ on jooniselt selgelt näha, et operatsioonivõimendi väljundist tuleb samuti välja 6 voldine pinge, olenemata sellest, mis on antud opvõimendi toitesisendisse, kuid mitte kunagi ei saa väljundpinge ületada toitepinget. [1]

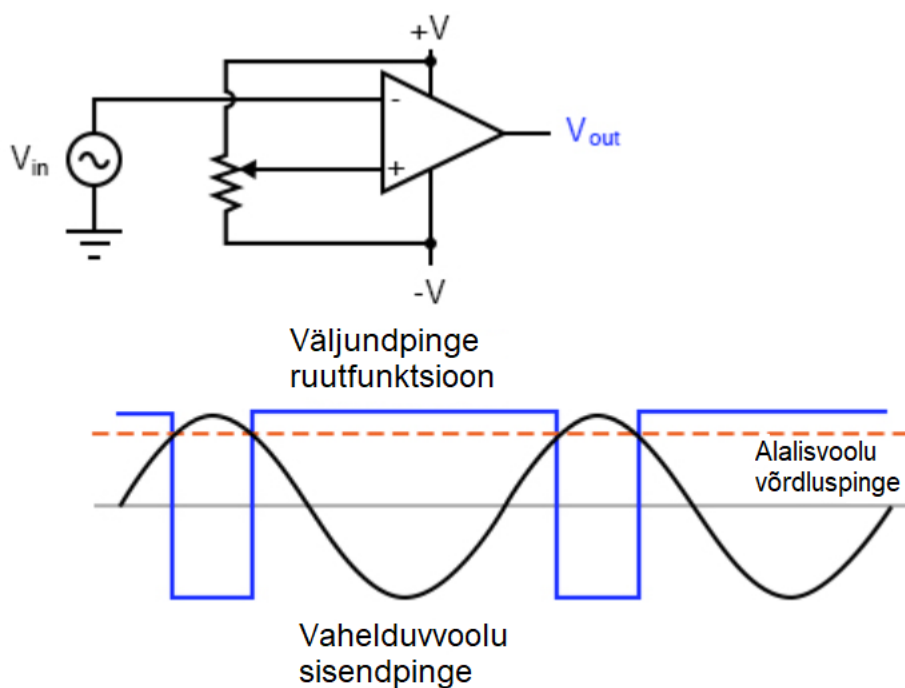
1.2.2. Positiivse tagasisidega operatsioonivõimendi

Positiivse tagasiside korral ühendatakse osaväljundpingest mitteinvertiivasse sisendisse. Kui toome tagasiside mitteinvertiivasse sisendisse ning invertiiv sisendi maandame, siis väljundpinget mõjutatakse pinge suuruse ning polaarsusega. Kui see pinge on positiivne, siis muutub ka operatsioonivõimendi väljund positiivseks, tuues see positiivne pinge tagasi mitteinvertiivasse sisendisse, siis on tulemuseks positiivselt küllastunud väljund. Kui mitteinvertiiv sisendi pinge peaks algama negatiivseks, muutub operatsioonivõimendi väljund negatiivseks, tagastades negatiivne pinge mitteinvertiivasse sisendisse tekib negatiivselt küllastunud väljund. [4]

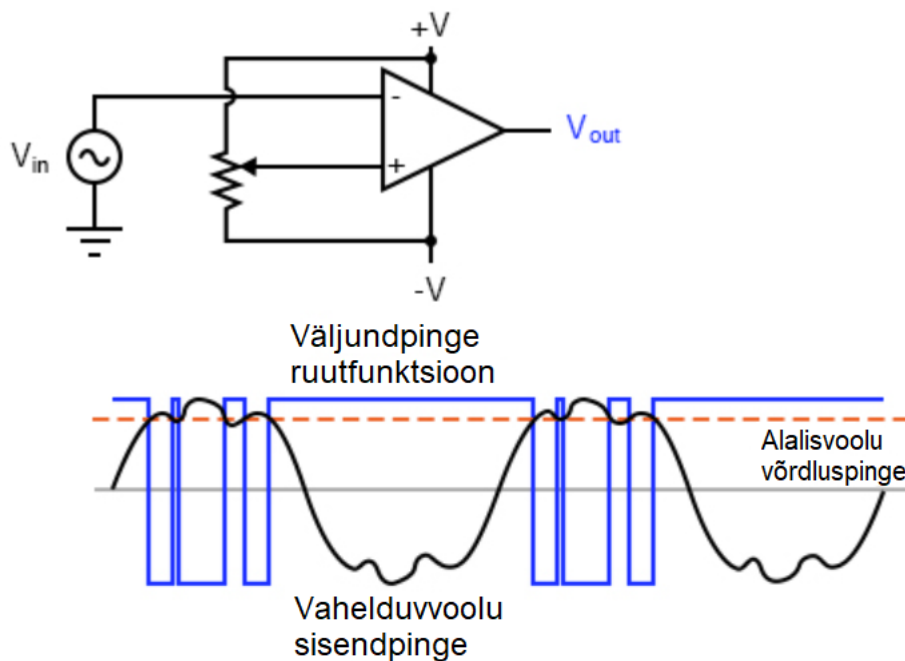
Positiivse tagasisidega OV jääb püsima ükskõik millisesse väljundi olekusse, millesse see määratud on. See jääb paika küllastunud positiivse või küllastunud negatiivse oleku vahele. Tehniliselt on selline olukord tuntud kui hüsterees. [4]

Hüsterees võib komparaatori vooluringis olla väga kasulik. Komparaatori abil saab ruutlaine tekitada ükskõik millise lainepikkuse (siinuslaine, kolmnurklaine jm) sisendiga. [4] Hüsterees tagab selle, et kui soovime näiteks õhuniisutit kasutada koos anduriga, ehk andur võtab vastu kui suur on õhuniiskus ruumis, mis on määratud soovituks ning vastavalt sellele, kui õhuniiskus on väiksem kui soovitud, lülitab niisuti ennast tööle ning soovitud niiskuse saavutamisel välja, kuid ruumi õhuniiskus oleneb paljudest erinevatest tingimustest ja eriti kütteperioodil võib niiskuse tase kiiresti muutuda. Hüstereesi kasutamine tagab selle, et iga väiksema muutuse peale ei lülitaks õhuniisuti ennast pidevalt sisse ja välja. [4]

Kui sisenev vahelduvvoolu lainepikkus on müravaba, siis töötab antud komparaatori hüstereesi lülitus ideaalselt, mida on näha joonisel 1.4. Kui aga sisendisse minev lainepikkus pole ideaalne, vaid kõrvalekalletega, mis põhjustavad pinge olulisi tõuse ja langusi ühe tsükli vältel, siis võib komparaatori väljund muuta ootamatult oma lülitust: tekib tõrgetega ruutlaine, mida on näha joonisel 1.5. [4]

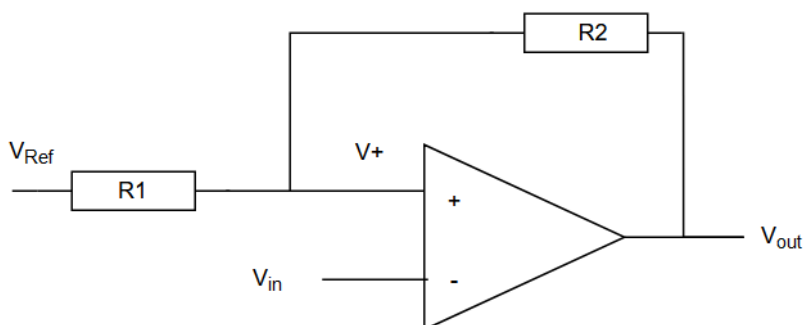


Joonis 1.4. Ideaalse komparaatori töö. [4]



Joonis 1.5. Tõrgetega komparaatori töö. [4]

Üks enam levinuid positiivse tagasisidega lülitusi on *Schmidti trigger*, see on komparaator, mis rakendab sisendsignaale hüstereesi. Antud lülituse skeem on näha joonisel 1.6. Kui sellisel lülitusel on väljundpinge V_{out} küllastunud positiivse toitesisendi suunas, siis rakendatakse operatsioonivõimendi mitteinvertorivasse sisendisse maapinnaga võrreldes positiivne pinge. Antud olukorra eelis on immuunsus müra vastu, mis tagab puhtama väljundsignaali. Kui aga väljundpinge on küllastunud negatiivse toitesisendi V_s suunas, siis rakendub mitteinvertorivale sisendile maapinna suhtes negatiivne pinge. [1]



Joonis 1.6. Ideaalsele operatsioonivõimendi juhule vastav *Schmidti triggeri* lülitus.

Operatsioonivõimendite üldreegel on, et positiivne tagasiside suurendab sisendite vahelist erinevust ning negatiivne tagasiside vähendab sisendite vahelist erinevust. Negatiivse tagasiside puhul muudab operatsioonivõimendi oma sisendpinged võrdseks. Ligikaudu 95% tagasisidega operatsioonivõimenditest, mida kasutatakse on negatiivse tagasisidega OV-d. [1]

2. KATSESEADME DISAIN

2.1. Katseseadme kasutajaliides

Projekti üks peamisi nõudeid oli, et õppeseadmel oleks võimalik kasutaja poolt muuta tagasisidesid ning takistusi, mis võimaldaksid luua erinevaid pingeid sisenditesse. Seadme eesmärk oli võimalikult lihtsalt näidata ka operatsioonivõimendi sisend- ning väljundpingeid, mistõttu sai kasutusele võetud Arduino ning OLED-ekraan, kuhu kuvada koheselt vastavad pinged. Ekraanile õigete pingete mugavaks kuvamiseks sai loodud Arduino IDE programmiga vastav programmeerimiskood, mille abil toodi ekraanile OV tingmärk, kus õigetes kohtades on olemas ka vastavad pinged, et kõigi kasutajate jaoks oleks katseseade võimalikult kergesti arusaadav.

Katseseadme karbi kaanele on toodud vajalikud maketeerimislaudad, kuhu lihtsal viisil ühendada tagasiside loomiseks takisteid. Lisaks on sinna toodud ka eraldi sisendpingete 5 V pinid, et ka sealt saaks operatsioonivõimendi sisendisse läbi takistite erinevaid pingeid. Turvalisuse huvides on antud 5 V sisendpingete pinid skeemis ühendatud läbi lülitite ehk neid on võimalik ka vooluringist eemaldada, samuti on läbi lülitite ühendatud ka potentsiomeetrid.

Karbi kaanele on toodud ka maanduse pinid – loomaks vastavatel lülitustel kergel lahendusel ühendused maandusega. Juhtmete ristumist ning üle ekraani jooksmise vältimiseks on maanduse punkte toodud kaanele neli. Sel eesmärgil on ka maketeerimislaudu karbi peal kaks, et saaks luua tagasisidega lülitusi, ilma et peaks juhtmeid viima üle ekraani, mis varjaksid tulemuste nägemist.

Kõik, mida seadme kasutajal pole vaja otseselt muuta – ühendused Arduino ja operatsioonivõimendiga, vooluringi loomiseks sisendpinge ja maandus, lülitite, potentsiomeetrite ning OLED-ekraani ühendused on viidud karbi sisse. Siiski on operatsioonivõimendi ühendatud maketeerimislauale, et vajadusel oleks võimalik kasutatav operatsioonivõimendi ka välja vahetada.

2.2. Arduino IDE

Vajalikud pinged skeemilt ekraanile loob autor kasutades Arduinot, mis on avatud lähtekoodidega elektroonika platvorm ning põhineb kergesti kasutatavast riist- ja tarkvarast. Need on võimelised lugema sisendeid (anduri valgus, nupu vajutus jm) ning muutma need väljunditeks (mootori aktiveerimine, valgusti sisselülitamiseks). Selleks, et Arduino seade saaks aru, mida kasutaja soovib, tuleb makettplaadil asuvale mikrokontrollerile saata vastavad juhised kasutades Arduino tarkvara. [5]

Tänu oma lihtsusele ja ligipääsetavusele kasutatakse Arduinot väga paljudes erinevates projektides ja rakendustes. Kuna on hõlpsasti kasutatav ka algajatele, siis tänu sellele sai Arduino valitud ka antud töö eesmärgini jõudmiseks. Arduino arendusplaadi kaudu luuakse skeem erinevate operatsioonivõimendi lülituste loomiseks ning näidatakse, kuidas need toimivad.

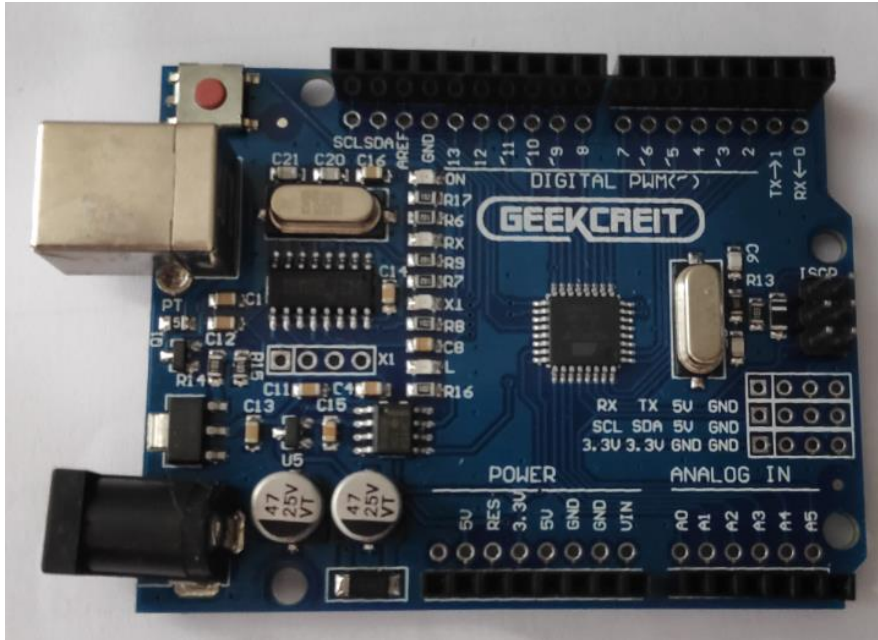
Skeemi loomise eesmärgiks on näidata, kuidas toimivad erinevad sagedamini kasutatavad operatsioonivõimendite lülitused ning kuvada vastavad sisend- ja väljund väärtused Arduino abil ka OLED ekraanile, et saaks luua parema ülevaate pingete muutumisest või püsimisest.

Vastavad lülitused, mida skeemis kajastatakse, said valitud teoreetilise töö käigus, et näidata nii lihtsamaid versioone kui ka järk-järgult keerulisemaid lülitusi, kuid samas enim kasutatavaid lülitusi: komparaator, pingejärgija, lõpliku võimendusega võimendi – mitteinvertiiv võimendi, *Schmidti trigger*.

2.3. Seadmed

Seadme kokkupanemisel kasutas töö autor Arduino arendusplaati Geekcreit, AD8542 operatsioonivõimendit, makettplaati, OLED-ekraani, paari takistit ja potentsiomeetrit, LED-valgustit, lüliteid vajalike osade pingetuks tegemiseks ning juhtmeid. Lisaks loodi seadme kompaktsuse loomiseks sellele ka korpus 3D printeri abil.

Antud töös on kasutusele võetud Arduino arendusplaat Geekcreit uno, mis on näha joonisel 2.1 ning mille pinout on näha lisas 1. Plaat osutus valituks oma mugavuse, lihtsuse ning paljude väljundite ning sisendite tõttu.



Joonis 2.1. Arduino arendusplaat Geekcreit.

Loodud seadmes kasutatavaks operatsioonivõimendiks osutus AD8542, mille spetsifikatsioonid on leitavad Analog Devices leheküljelt. Tegemist on kaheeröpmelise sisendi ja väljundiga ühe toiteallikaga võimendiga. Antud OV töötab nii 2,7 V kui ka 5 V toiteallikaga ning antud töös osutubki kasutatavaks 5 V toiteallikas. AD 8542 operatsioonivõimendi on optimeeritud madalate toitepingete korral säilitama oma suure kasumi, mis teevad selle kasulikuks kasutamisel aktiivsete filtrite ja võimendustappide jaoks. [6]

Kasutusele on võetud juba valmis toodangu makettplaat, kus sees on olemas juba valmistoodetud trükkplaat. See koosneb metallkihtidest, mis on elektrit juhtivad ning nende vahel on isolatsioonikihid, mis on elektrit mittejuhtiv materjal. Isolatsioonikihid tagavad plaadi tugevuse ning juhtkihtide vahele isolatsiooni. Antud töös on kasutatud makettplaati, kus on võimalik valmiskomponendid ühendada alusplaadile läbi avade ning neid ei pea plaadi külge tinutama. [7] lk 121

OLED-ekraan, mida on näha joonisel 2.2. osutus valituks tema lihtsuse ning energiatõhususe tõttu. Antud mudel kasutab Arduinoga suhtlemiseks I2C sideprotokolli, mis tagab ka lihtsa ühendamise. Vastavalt ühendatakse 0-punkt (GND) arendusplaadil või makettplaadil asetseva 0-punktiga (GND), VCC ühendatakse sisend, milleks antud töös on 5 V, antud ühendused tagavad OLED-ekraanile vooluringi ning seejärel tekitatakse suhtlus Arduinoga vastavate SCL ja SDA viikidega. [8]



Joonis 2.2. OLED-ekraan.

Muutakistitena on seadmes kasutusele võetud pöördpotensiomeetrid, et saaks skeemis tekitada pöördtakisti abil erinevaid pingeid lihtsal, mugaval ja kiirel viisil. Töös kasutatav B10K potensiomeeter ehk mille piirid on 0 kuni 10 kiloohmi on näha joonisel 2.3.



Joonis 2.3. Seadmes kasutatav pöördpotensiomeeter.

Antud katseseadmes kasutatava potensiomeetrite piirid on üsna suured, mis tähendab, et seda tundlikum see on, mida väiksemad on takistuse piirid, seda sujuvamat tööd potensiomeeter võimaldab.

3. KATSESEADME EHITUS

3.1. Programmeerimine

Kogu seadme ehitust alustati Arduinole programmeerimiskoodi kirjutamisega. Koodis määrati, milliseid sisendeid, väljundeid peaks seade aru saama ja mõõtma ning seejärel sai programmeeritud OLED-ekraanile ka operatsioonivõimendi tähistus koos vastavate sisend- ja väljundkanalite (inverteeriv ja mitteinverteeriv sisendpinge ja väljundpinge) väärtustega, mida operatsioonivõimendi töö hindamiseks on vaja. [8]

Programmeerimiseks vajalikud oskused ja teadmised omandas töö autor *Random nerd tutorial* leheküljel olevatel näidistel ning varasemalt õpitud teadmistel, neid kohandati vastavalt antud tööga seotud vajadustele. Arduino IDE-s on programmeerimisel olemas ka näidised, samuti oli olemas näidis ka pingete lugemiseks, mida on kasutatud ka käesolevas lõputöös. Töös võeti Arduino IDE-st kasutusele näide 01. Basics – Read Analog Voltage ning seda kohandati vastavate signaalisisendite ja väljundite jaoks. Valmis kirjutatud programmeerimiskood on näha lisas 2.

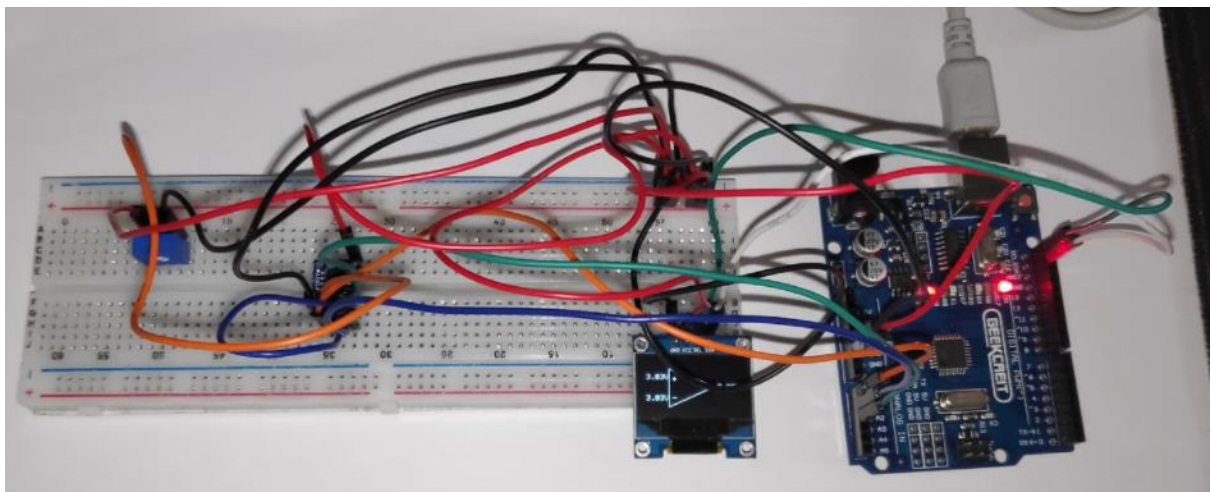
3.2. Projekteerimine ja 3D printimine

Kõige mugavamaks ning odavamaks seadme konstruktsiooni loomise viisiks osutus 3D printimine. See on kolmemõõtmelise detaili valmistamine plasti abil. Enamasti kasutatakse antud viisi prototüüpide või mudelite visualiseerimiseks ning ka lõpp-produktide valmistamiseks, nii ka antud lõputöö raames. [9]

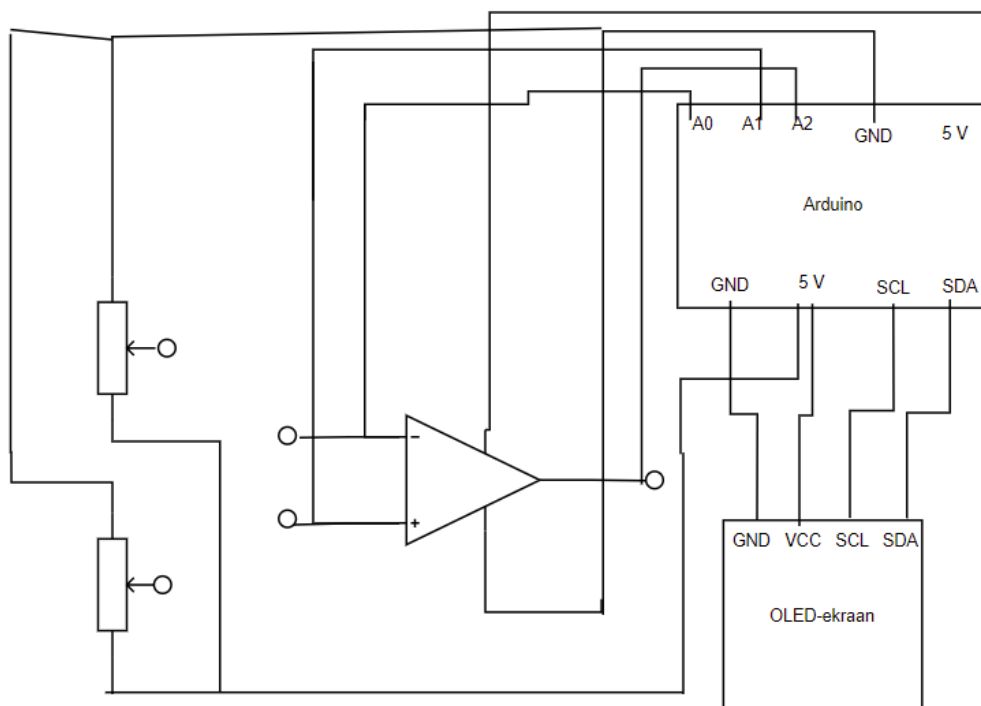
Antud projekti puhul kasutati plastiks PLA-d (termoplastiline alifaatne polüester), mis on bioloogiline plast. PLA omadusteks on kõrge kõvadus, termoplastiline käitumine, hea vormimisvõime ning kõrge elastsusmoodul, mis on kõik vajalikud 3D prinditud detaili

kasutamiseks. Tänu oma headele omadustele kasutataksegi PLA-d tihti elektroonikaseadmete ümbristes. [10]

Seadme kokkupanemine algas prototüübi loomisest, mida on näha joonisel 3.1. Tuli läbi mõelda, mida on vaja seadmega näidata ja teha ehk sai valitud vastavad operatsioonivõimendi lülitused: komparaator, mitteinvertiiv võimendi, pingejärgija ja *Schmitdi trigger*. Seejärel tuli luua Arduino ühendamiseks elektriskeem seadmete ühendamiseks, mida on näha joonisel 3.2. ning sai alustada makettplaadile vooluringi loomise võimalusega ehk ühendati sisendpinge 5 V ning maandus, mille kaudu on lihtsam tekitada vooluringi ka OLED-ekraanile ja operatsioonivõimendile. Seejärel ühendati OLED-ekraan Geekcreit arendusplaadiga, kust ta saab ühenduse vastava Arduino programmiga, millest saab programmeerimiskoodi, mis loovad ekraanile vajalikud väärtused. Edasi loodi vastav skeem operatsioonivõimendile ning nii ilmusid ka vastavate pingete väärtused ekraanile.



Joonis 3.1. Arduinol põhineva operatsioonivõimendi seadme prototüüp.

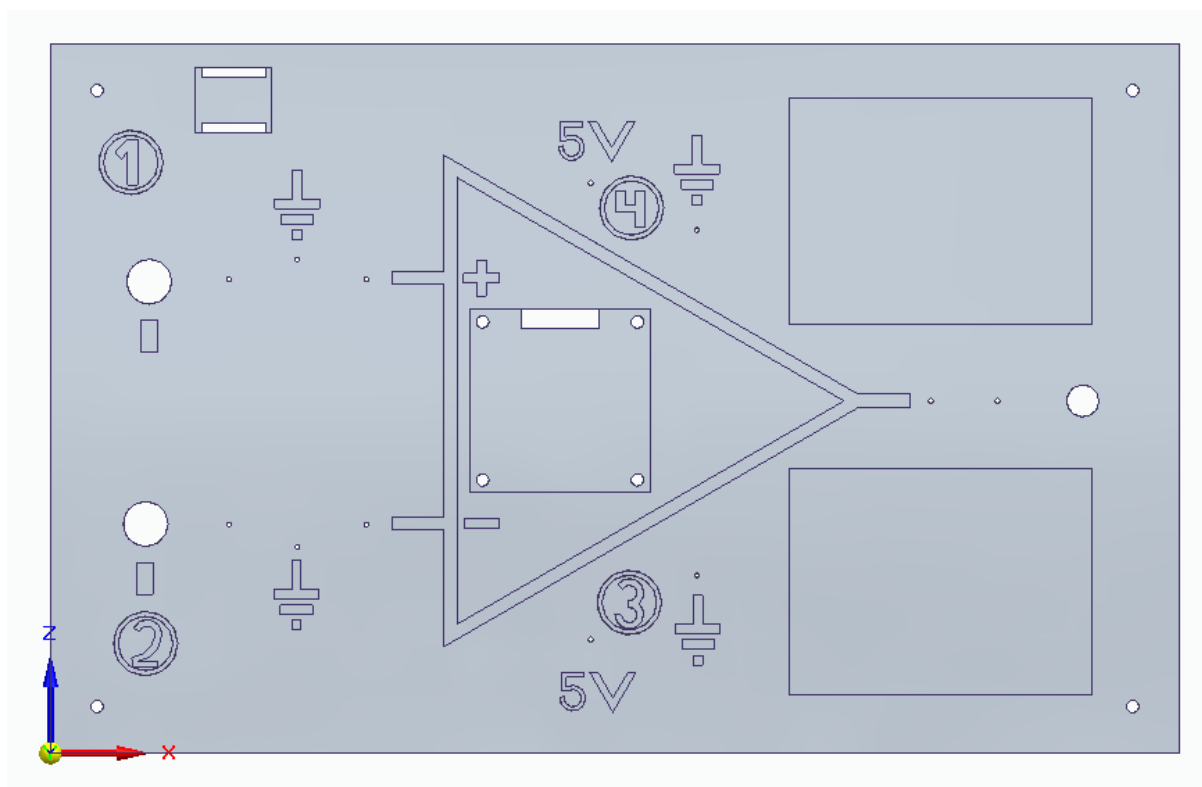


Joonis 3.2. Arduino külge komponentide ühendamise elektriskeem.

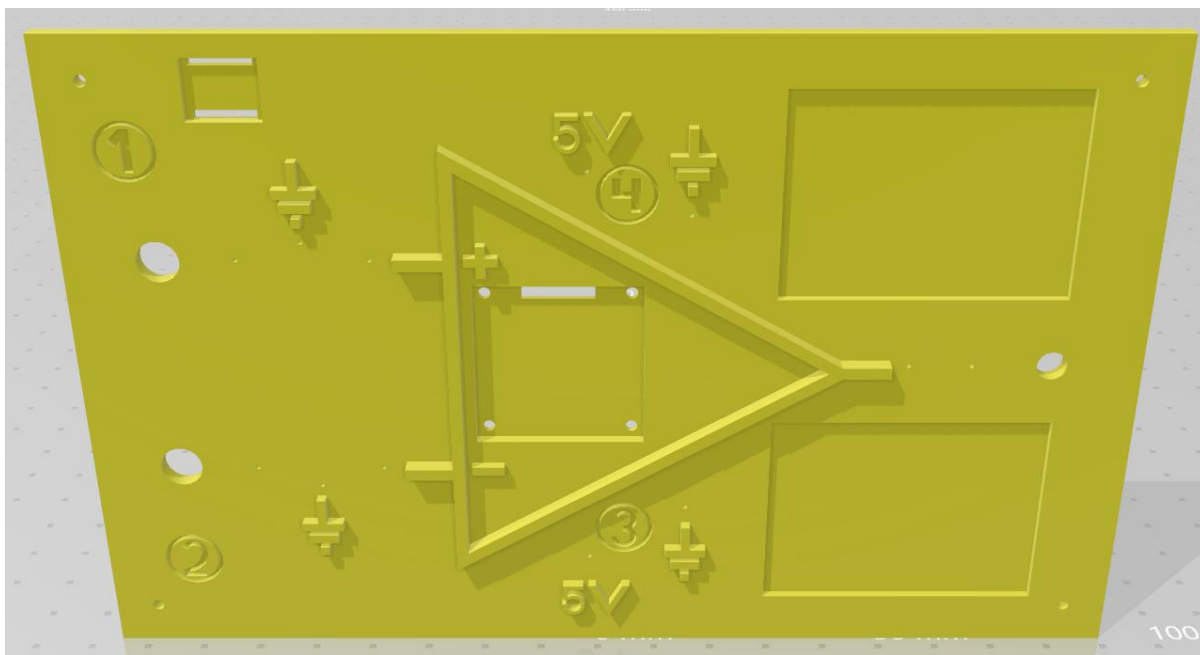
Prototüübist arenes edasi konkreetne ühes tükis katseseade, mille korpus on projekteeritud Solid Edge 2020 programmiga, mida saab õpilasena kasutada tasuta. Esimesena sai loodud seadmele kaas, kuhu loodi asukohad ühele diodile, mis visualiseerib väljundpinge olekut. Kohad kahele potentsiomeetrile, mille eesmärgiks on luua erinevatele katsetele vastavalt erinevaid pingeid, lisaks sai loodud ka augud, kuhu lisada pinid, mille abil skeemi osad võimalikult lihtsalt üksteisega ühendada. Samuti on loodud kaanele operatsioonivõimendi tingmärk, operatsioonivõimendi ise on paigaldatud tingmärgi alla karbi sisse. Operatsioonivõimendi tingmärgi keskele on tekitatud süvis OLED-ekraanile, mis näitab vajalikke sisend- ja väljundpingeid. Lisaks on kaanele jäetud ruumi ka kahele makettplaadile, et saaks vastavalt skeemidele lisada veel vajalikke tarvikuid tagasiside jaoks. Karbi kaas sai printitud Solid Edge'iga joonestatud joonise põhjal 3D printeriga, vastavad Solid Edge ja 3D-objekti joonised on näha joonistel 3.3. ja 3.4. Antud karbi kaane printimine võttis aega 5 h ja 43 min ning materjalikulukuks oli 58 g.

Karbi kaane jaoks teostati mitu erinevat versiooni, mille põhjal autor sai tuvastada vead, missuguseid mõõtmeid oli vaja veel muuta või millised detailid vajasisid veel lisamist või ümberpaigutust ning parimaks lahenduseks sai kolmandana trükitud kaas.

Esialgsetes versioonides puudusid näiteks kohad makettplaatidele, kuid stabiilsuse loomiseks said nendele tekitatud süvendid. Samuti puudus lülititele mõeldud asukoht, mis sai turvalisuse kaalutlustel seadme konstruktsiooni mõeldud alles pärast esimese versiooni valmimist.



Joonis 3.3. Väljalõige Solid Edge 2020 programmiga joonestatud karbi kaanest.



Joonis 3.4. Väljalõige karbi kaane joonestusest STL formaadis.

Järgmisena sai loodud seadme kokkupanekuks karbi kaanele ka põhi, et juhtmed ja ülejäänud seadmed, mis ei lähe karbi kaanele, nagu Arduino, suur osa potensiomeetritest, operatsioonivõimendi koos makettplaadiga ning toitepinge ja maanduse makettplaadid. Karbi põhja joonised, mis on näha joonistel 3.5. ja 3.6., said samuti projekteeritud Solid Edge 2020 programmiga, kuhu sai loodud kinnituskohad nii Arduino arendusplaadi kinnitamiseks, kui ka kaane kinnitamiseks kruvidega. Kuna Arduino toitesisendid asetsevad arendusplaadist üle, siis projekteeriti karbi seina sisse eraldi avaused, et toitesisend mahuks karpi. Sellise lahenduse korral ei pea ka iga kord karbi kaant ühendamiseks üles tõstma ning lisaks tagab see arendusplaadi kindlama kinnituse. Ülejäänud detailid said põhja külge liimitud ning neile otseselt kindlat kohta 3D projekteerimisel ei loodud.

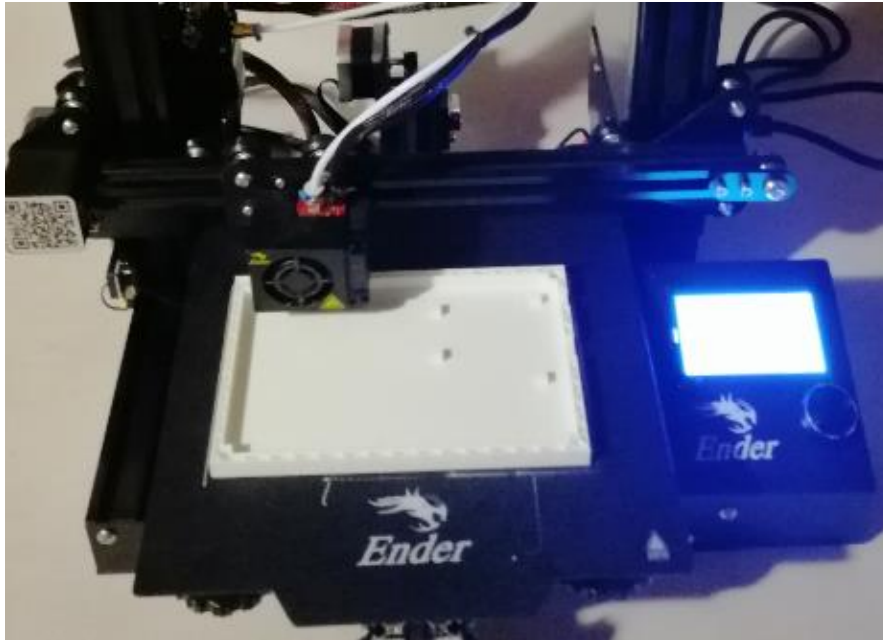


Joonis 3.5. Solid Edge programmiga karbi põhja joonis.



Joonis 3.6. STL formaadis karbi põhi.

Karbi printimine 3D printeriga, mis on näha joonisel 3.7. võttis aega umbes 7 h ja 28 min, mis näitab selgelt, kui mahukas protsess on 3D printeriga loodud detailid. Antud katseseadme põhja loomisel kasutati PLA prinditud paksuseks 0,2 mm.

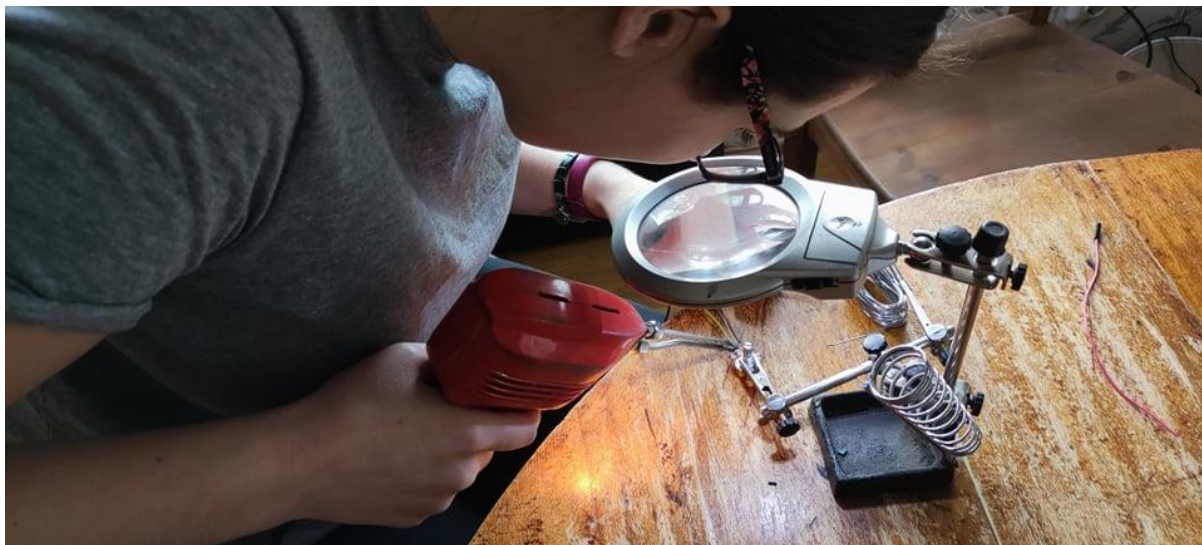


Joonis 3.7. Karbi 3D printimine.

3.3. Katseseadme komplekteerimine

Karbi ja kaane 3D detailide valmimisele järgnes seadme täielik kokkupanemine – vajalike detailide kinnitamine korpusele ning nende omavaheline ühendamine. Kõik seadmed, mis ei kuulu antud katseseadme juures väljavahetamisele on kinni joodetud ning üldjuhul on karbi sees olevad seadmed mittevahetatavad ning karbi kaanele saab ühendada erinevaid seadmeid läbi pinide ning maketteerimislaudade. Kaanele välja ulatuvad pinid said samuti kinni joodetud ning turvalisuse ja stabiilsuse huvides on need omakorda kinnitatud karbi kaane alumisele küljele kuumliimiga, et need ei vajuks oma august välja kui sinna külge midagi ühendada. Samuti said karbi sisse kinnitatud kiirliimiga maketteerimislaud ning kruvidega Arduino arendusplaat. Joonistel 3.8-3.10. on näha töö autorit kokku panemas katseseadet. Katseseadme valmimise protsessi on näha joonisel 3.11. ning täielikult valminud katseseadet

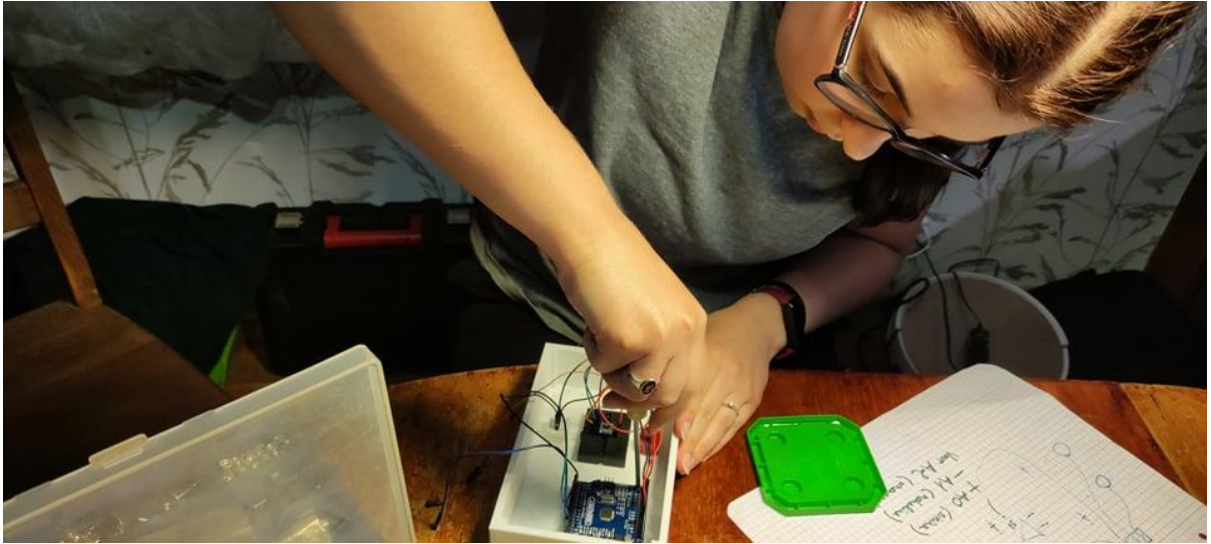
on näha joonistel 3.12. ja 3.13. Katseseadme detailide kokku panemine võttis aega umbes 7,5 h.



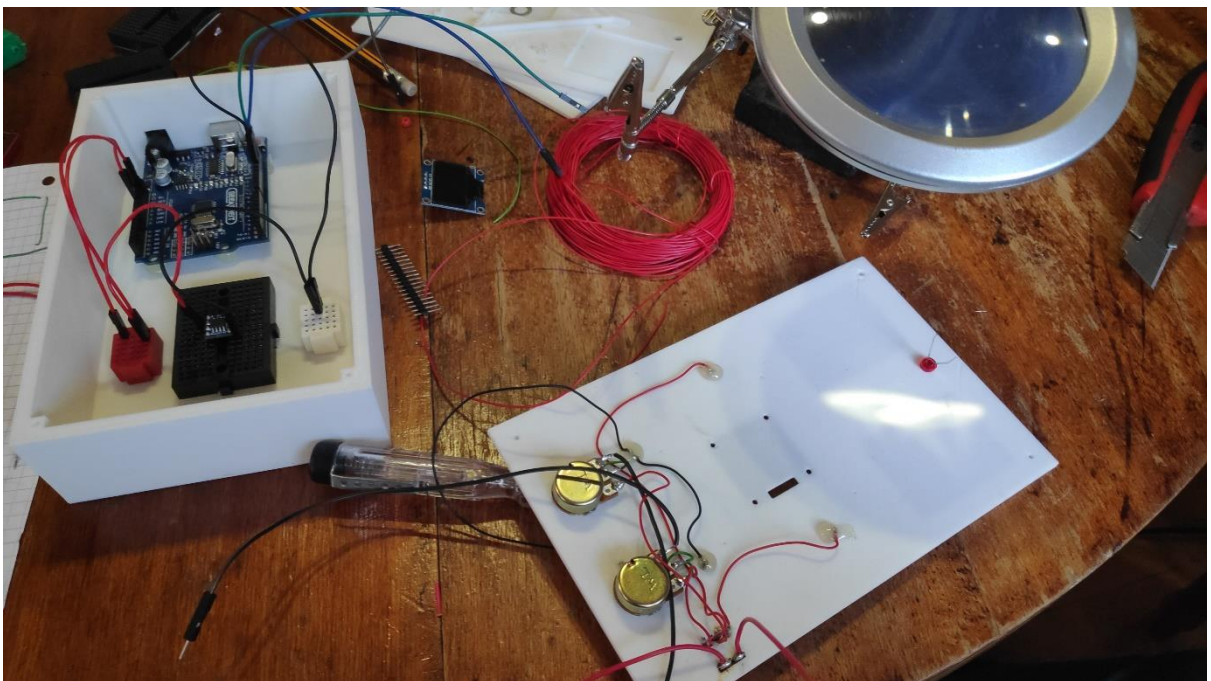
Joonis 3.8. Töö autor potentsiomeetrile juhtmeid jootmas.



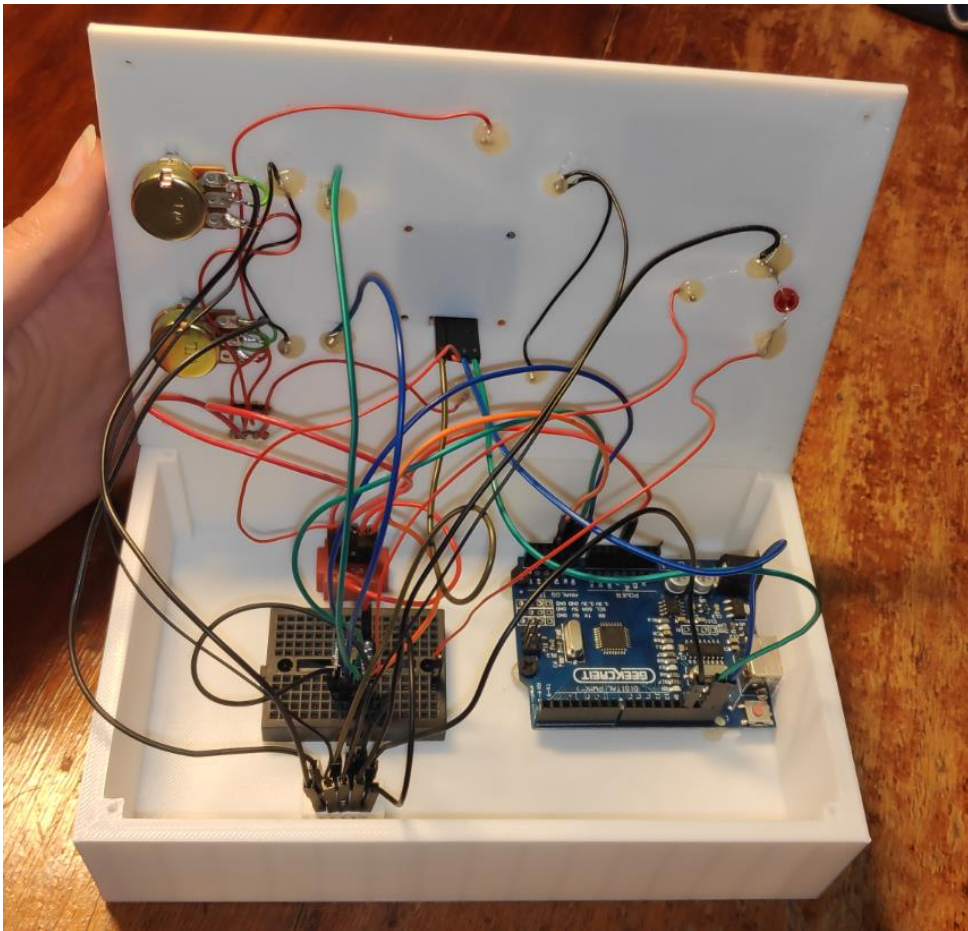
Joonis 3.9. Töö autor kinnitamas joodetud pine kuumliimiga karbikaanele.



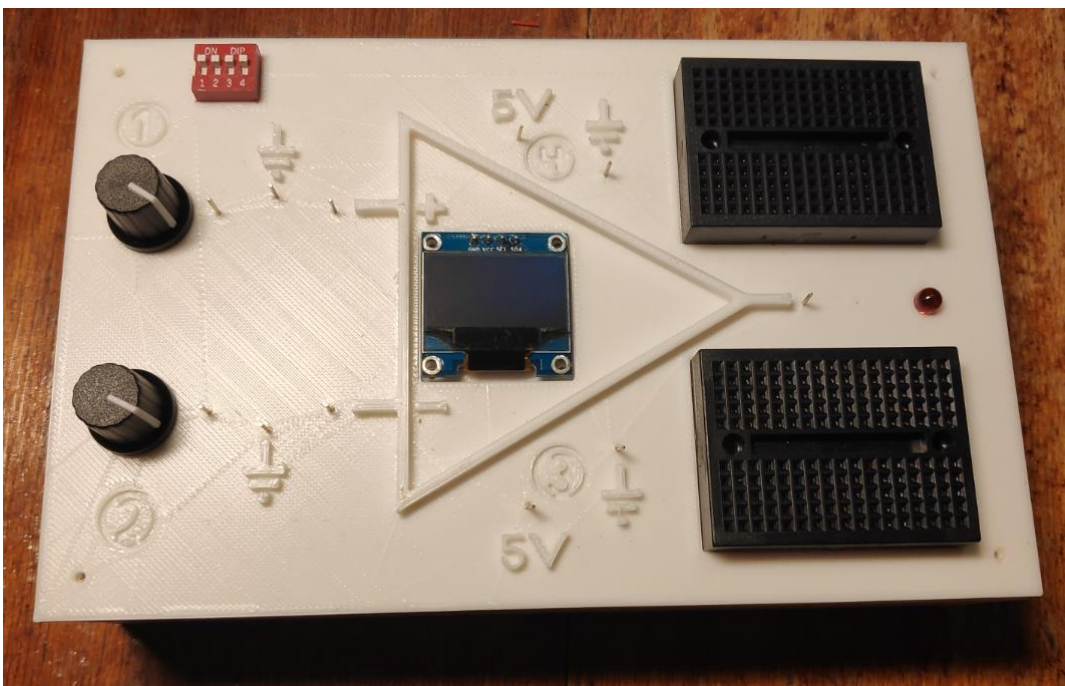
Joonis 3.10. Töö autor kinnitamas karbi sisse Arduino arendusplaati.



Joonis 3.11. Katseseade valmimise protsessi vältel.



Joonis 3.12. Valmis katseseademe karbi sisemus.

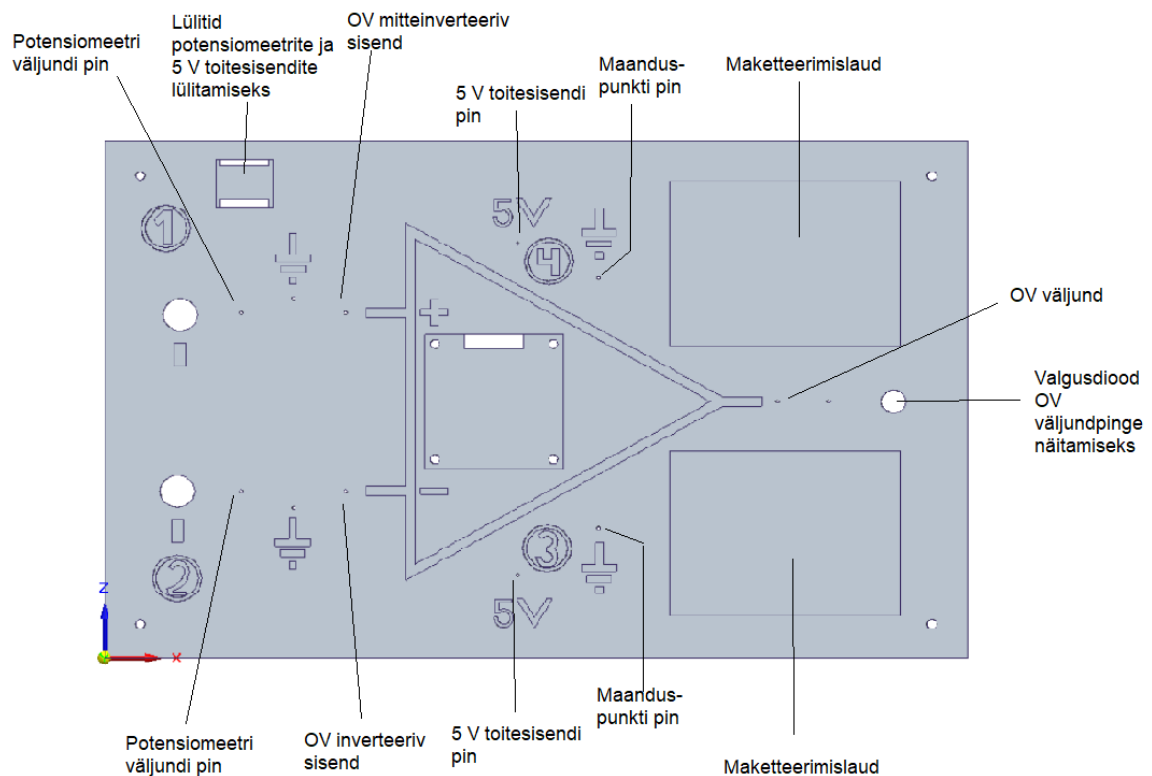


Joonis 3.13. Valmis katseseadme karbi kaas.

4. KATSESEADME KASUTUSVÕIMALUSED

4.1. Katseseadme kasutusskeem

Katseseadme mugavaks kasutamiseks on loodud katseseadme muutmata osade kohta ka kasutusskeem, mis on näha joonisel 4.1., mille abil on näidatud, millised on elemendid, ning mis on nende eesmärk.



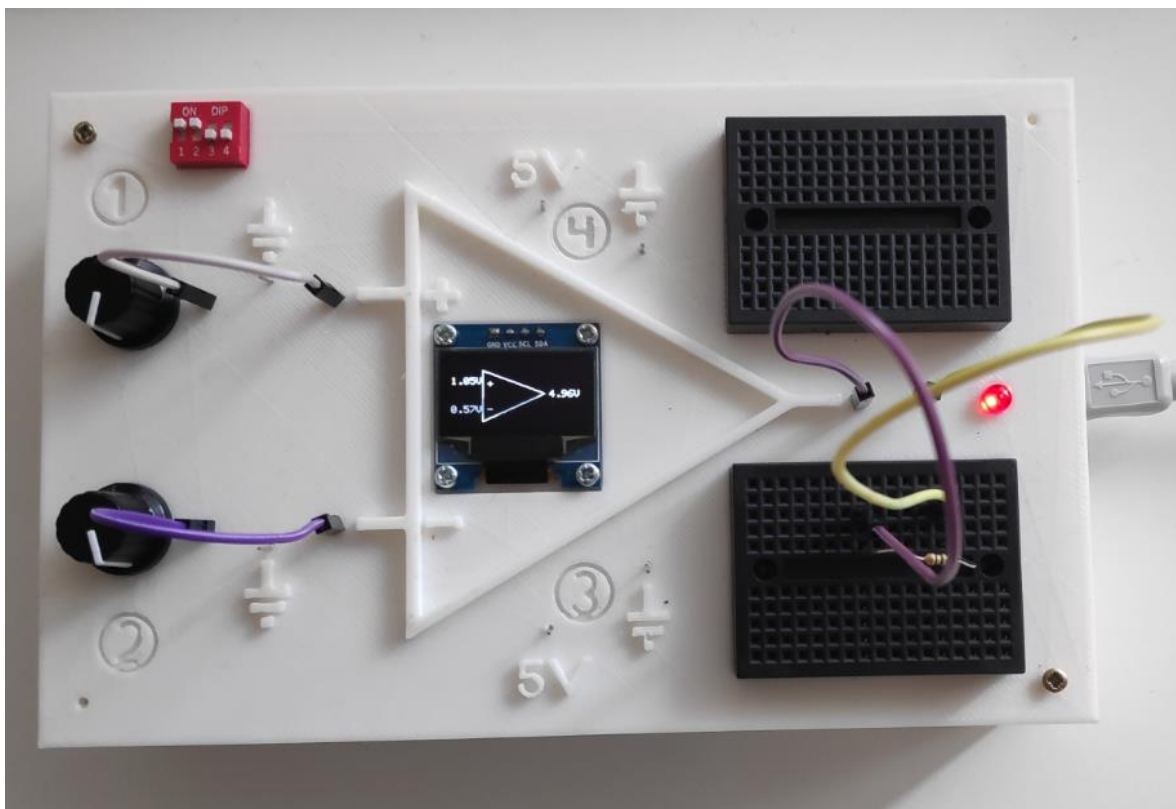
Joonis 4.1. Kasutusskeem Arduino põhjal loodud OV katseseadmele.

Jooniselt on näha, kust tulevad operatsioonivõimendi sisendite ja väljundi pin-id, kust saada toitesisendeid potentsiomeetritest OV inverteerivasse ja mitteinverteerivasse sisendisse või

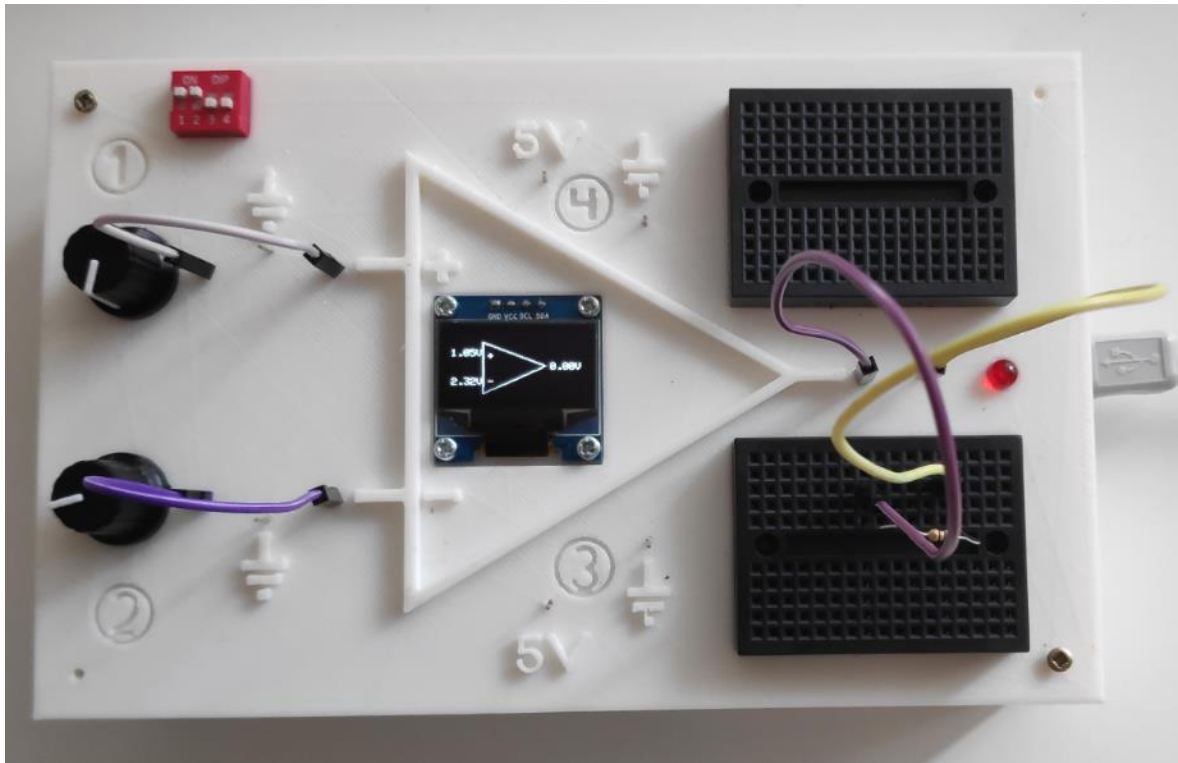
hoopis kust luua operatsioonivõimendi väljundist saadava pinge abil läbi maketteerimislaua tagasiside.

4.2. Komparaator

Katseseadme esimeseks näidiskatseks on operatsioonivõimendiga loodud komparaatori lülitus. Potensiomeetritelt on kasutajal võimalik sujuvalt muuta sisendpingeid ning näha, mis hetkel toimub ümberlülitus ehk mis hetkel valgusdiodid süttib või kustub, nii nagu on näha joonistel 4.2. ja 4.3.



Joonis 4.2. Katseseadmel koostatud komparaatori skeem, mil V_+ on suurem kui V_- .

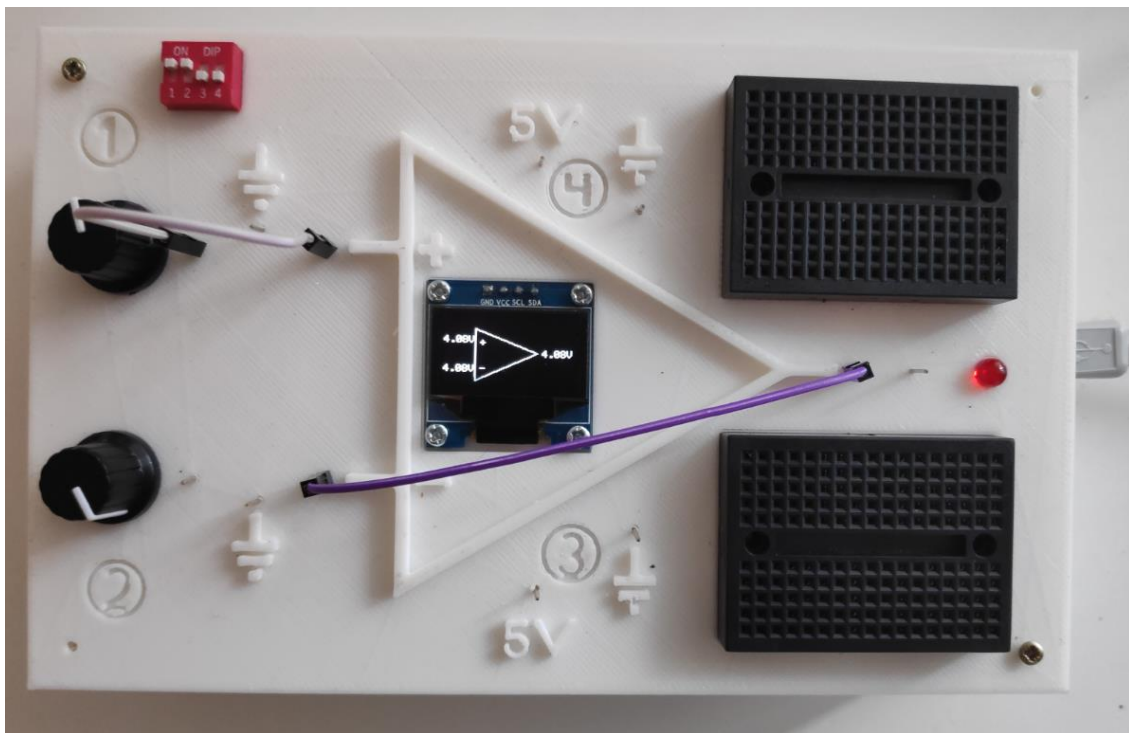


Joonis 4.3. Katseseadmel koostatud komparaatori skeem, mil V_- on suurem kui V_+ .

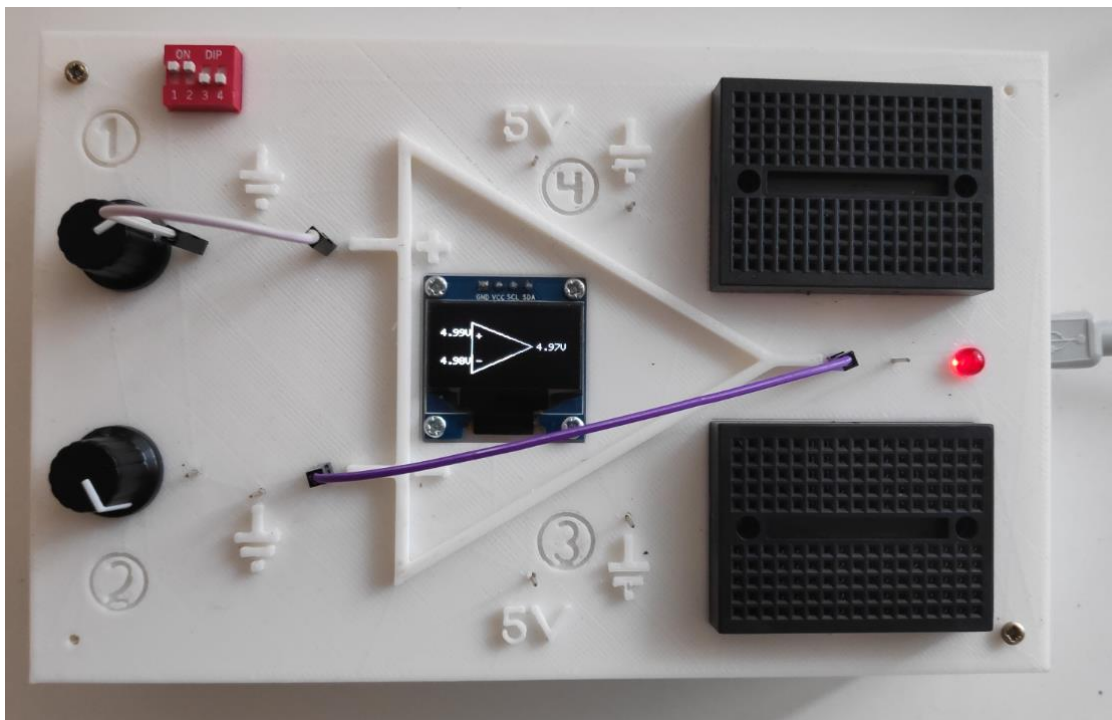
Esimesel juhul on mitteinverteeriv sisendpinge (V_+) suurem ja diood põleb, mida on näha joonisel 4.2. Teisel juhul ehk joonisel 4.3. on näha, kus on suurem inverteeriv sisend (V_-) ning diood ei põle.

4.3. Pingejärgija

Katseseadmega loodud teiseks näidiseks on operatsioonivõimendiga loodud pingejärgija skeem ehk on loodud negatiivne tagasiside, mille tulemusel muutuvad operatsioonivõimendi sisendid võrdseks. Väljundpinge V_{out} on toodud otse invertteerivasse sisendisse V_- ning mitteinvertteerivasse sisendisse V_+ on ühendatud potentsiomeeter. Joonisel 4.4. on näha ekraanilt, et kõik kolm pinget V_- , V_+ ja V_{out} on samaväärsed, kui muuta potentsiomeetrist mitteinvertteeriva sisendi pinget, siis muutuvad ka ülejäänud väärtused kaasa. Joonisel 4.5. on näha kuidas muutub valgusdiodi heledus võrreldes joonisel 4.4. nähtavaga, kui suurendada mitteinvertteerivat sisendpinget.



Joonis 4.4. Katseseadmega loodud pingjärgija skeem.



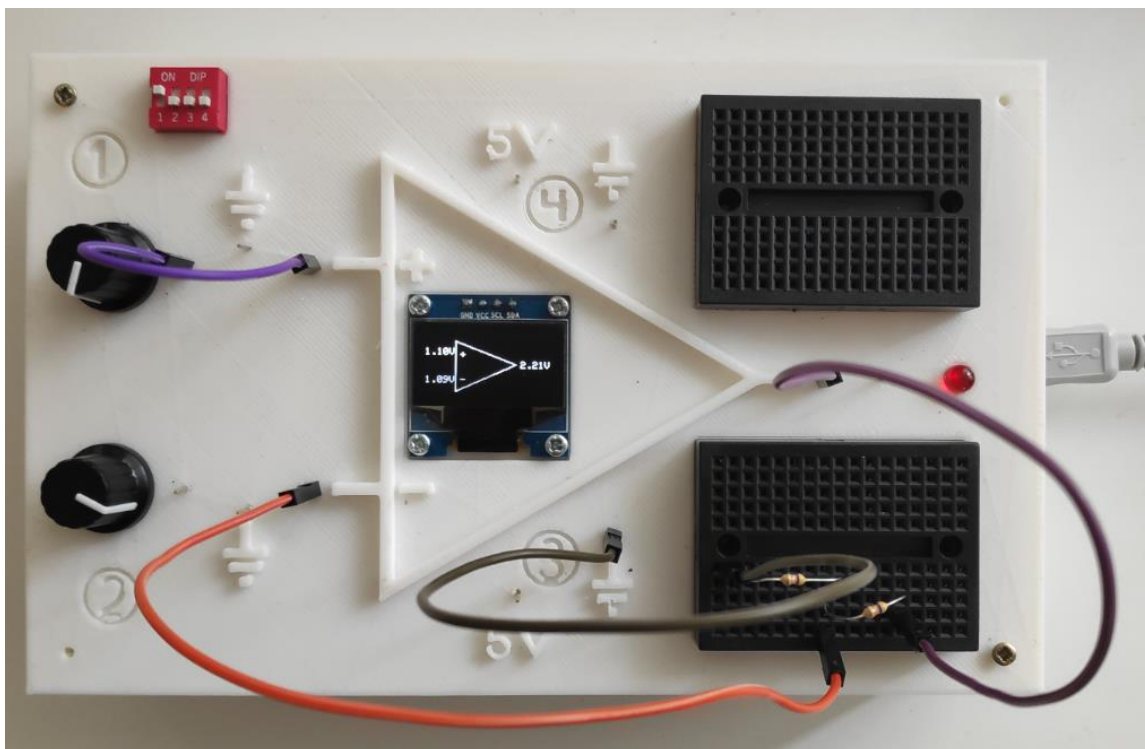
Joonis 4.5. Katseseadmega loodud pingjärgija skeem, kus on suurendatud mitteinverteerivat sisendpinget.

Valgusdiodi abil on kergesti näha, et kui mitteinverteerivat sisendpinget suurendatakse, siis hakkab see heledamalt põlema, kui aga pinget vähendatakse, siis tuhmimalt. See oleneb väljundisse jõudvast pingest, mis joonisel 4.4. on 4,08 V ning joonisel 4.5. on selleks 4,99 V, mida kõrgem on pinge seda eredamalt diod põleb. Antud katse selgemaks tegemiseks, et oleks näha üks tagasiside, on valgusdiodid väljundiga ühendatud karbi sees.

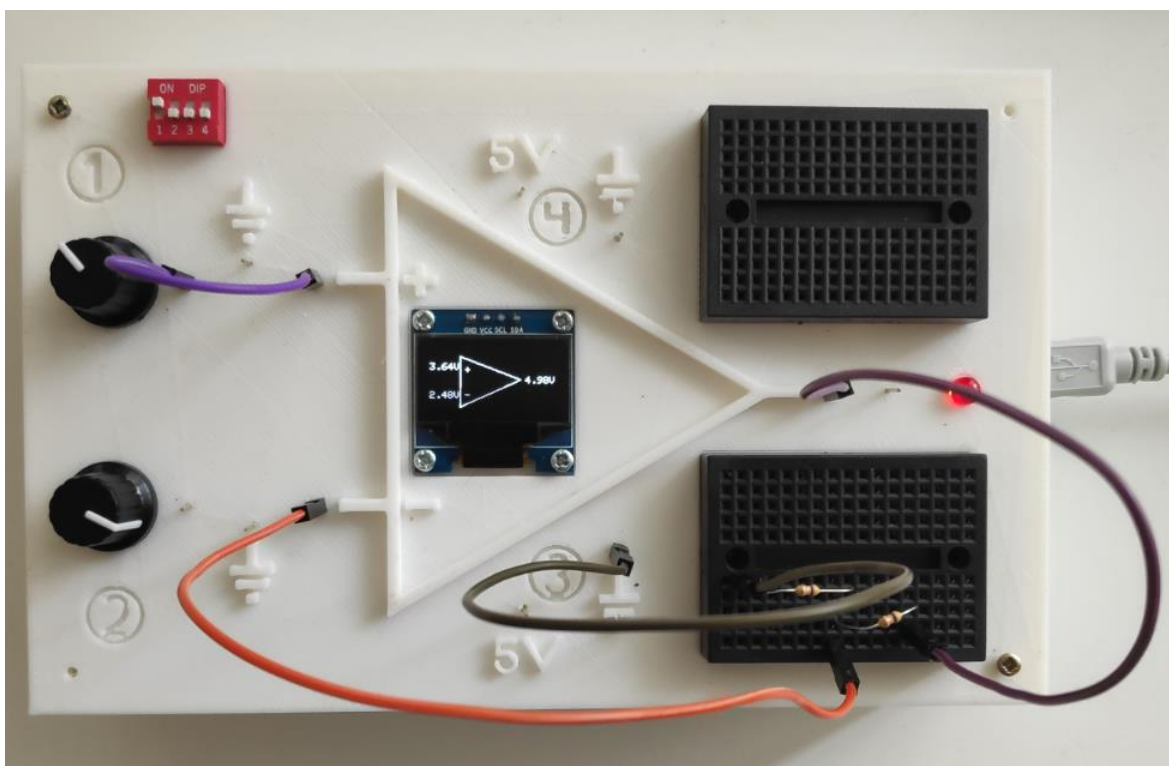
4.4. Mitteinverteeriv võimendi

Kolmanda katsena on loodud operatsioonivõimendi mitteinverteeriv võimendi. Jooniselt 4.6. on näha, et kasutades maketteerimislauda on toodud kahe võrdse takisti kasutamise abil tagasiside inverteerivasse sisendisse. Mis tähendab, et mitteinverteeriva sisendi pinget muudetakse potentsiomeetri abil.

Jooniselt 4.7. on näha, kuidas esialgu on küll väljundpinge tõusnud koos sisendpingega, kuid kui väljundpinge jõuab 5 voldini, siis see jääb paigale olenemata sellest, kui suureks tõuseb sisendpinge. Selle piiri paneb paika operatsioonivõimendile suunatud toitepinge, mis antud katseseadme puhul on 5 V.



Joonis 4.6. Katseseadmega loodud mitteinverteeriv võimendi.

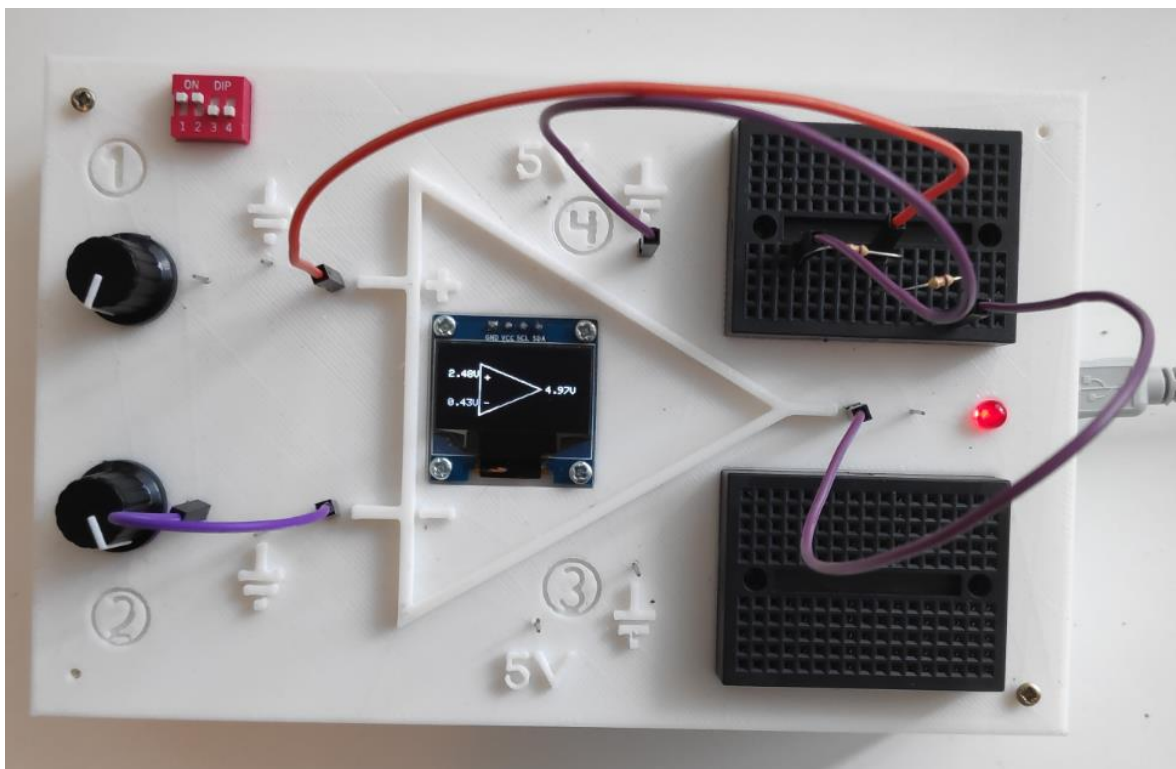


Joonis 4.7. Katseseadmega loodud mitteinverteeriv võimendi, kus olenemata sisendist ei ületa väljundpinge 5 V.

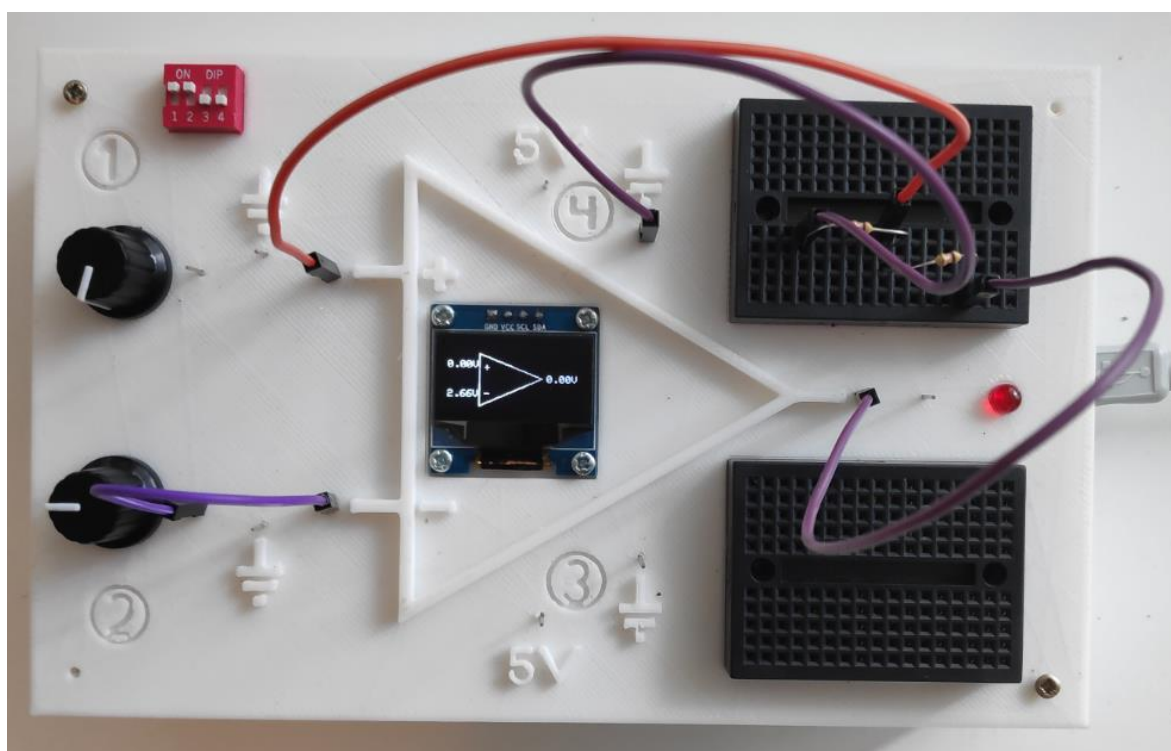
Joonistelt näeme, et antud mitteinverteeriva võimendi puhul on väljundpinge 2 korda suurem kui sisendpinge. Kui sisendpinget potensioomeetriga muuta, siis muutub sellega proportsionaalselt ka väljundpinge. Joonisel 4.7. on näha, kuidas väljundpinge jääb 5 V juurde paigale kuigi sisendpinge on 3,64 V ning 2 kordne võimendustegur enam ei rakendu. Kui operatsioonivõimendi toitesisend ei piiraks operatsioonivõimendi väljundpinge võimalusi, siis tekiks lõpmata suur pinge.

4.5. Schmidti trigger

Järgnevalt on õppevahendiga loodud operatsioonivõimendi *Schmidti triggeri* lülitus, kus on näidatud positiivset tagasisidet. Taaskord on kasutusele võetud inverteeriva sisendpinge muutmiseks potensioomeeter. Joonisel 4.8. on näha, et kui sisendpinge jääb alla poole nivood, siis diod põleb eredalt ning väljundisse jõuab maapinna suhtes positiivne pinge. Joonisel 4.9. on näha kuidas sisendpinge on nivoo ületanud.



Joonis 4.8. Katseseadmega loodud *Schmidti triggeri* skeem, kus sisendpinge jääb nivoo alla.



Joonis 4.9. Katseseadmega loodud *Schmidti triggeri* skeem, kus sisendpinge ületab nivood.

Jooniste 4.8. ja 4.9. põhjal on näha kuidas sisendpinge nivoo muutmine muudab vastavalt ka väljundit ning vastavalt sellele valgusdiodid süttib või kustub. Nivoo piiriks on antudjuhul võetud 2,48 V.

KOKKUVÕTE

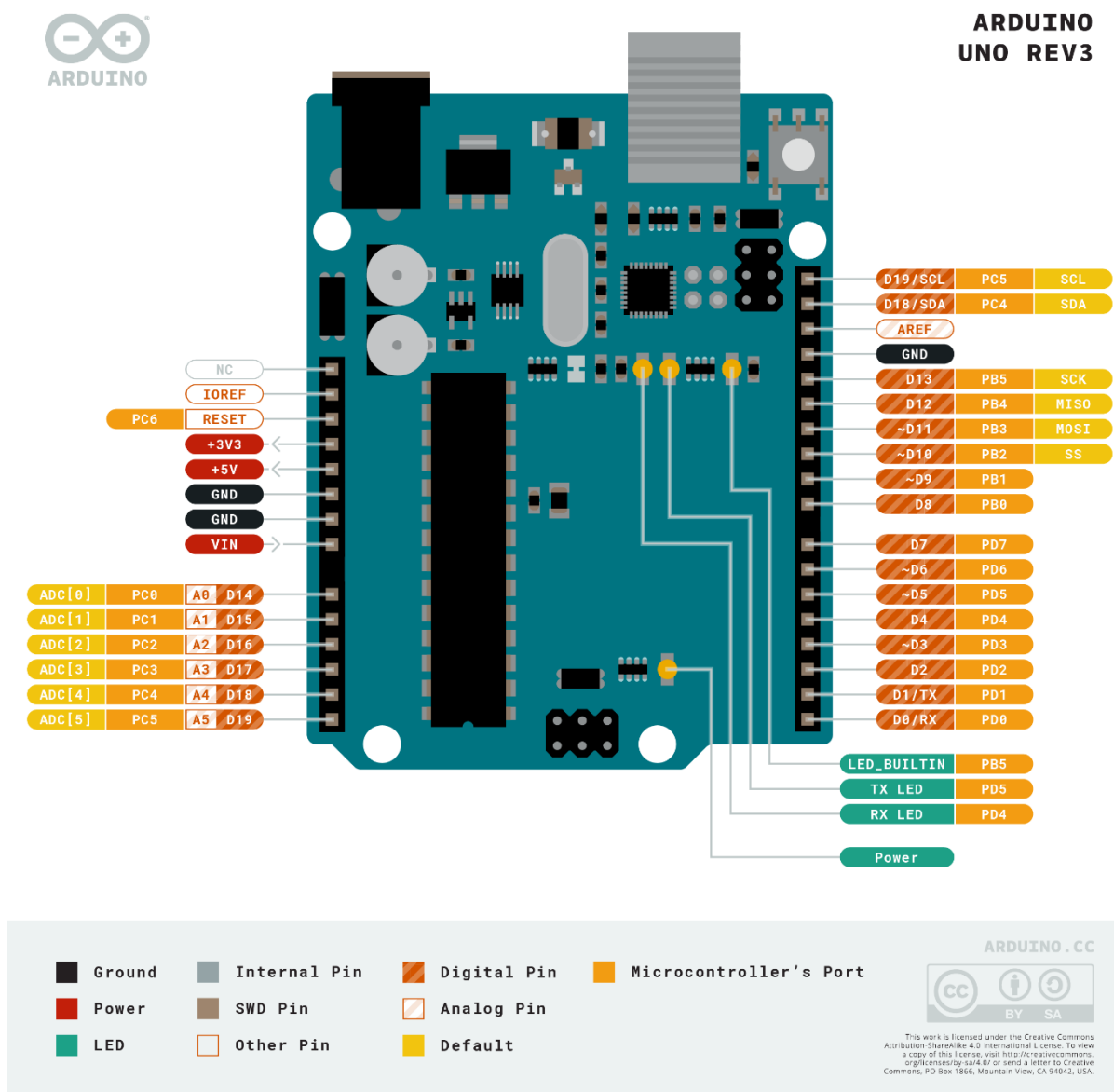
Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli projekteerida Arduinol põhinev operatsioonivõimendi katseseade, millega anda ülevaade operatsioonivõimendist ning selle tuntumatest lülitusviisidest. Töös valiti eesmärgini jõudmiseks kolm põhilisemat operatsioonivõimendi kasutusviisi, milleks olid komparaator ehk tagasisideta operatsioonivõimendi, pingejärgija ehk negatiivse tagasisidega operatsioonivõimendi ning *Schmidt trigger* ehk positiivse tagasisidega operatsioonivõimendi. Autor uuris katseseadme loomiseks Arduinot ning selle programmeerimiseks Arduino IDE programmi, mille abil loodi Arduinole programmeerimiskood, millega ta mõõtis ning arvutas operatsioonivõimendi sisendite ja väljundpinged ning kuvas need OLED-ekraanile. Katseseadme eesmärgi loomise kaudu, lõi töö autor ka katseseadmele korpuse, kuhu sisse ning külge ühendas vastavad seadmed: Arduino arendusplaat, maketteerimislauad, operatsioonivõimendi, potensioomeetrid, lüliti, pinid lihtsal viisil ühenduste loomiseks. Katseseadme korpuse projekteeris autor Solid Edge 2020 programmis ning see sai loodud 3D printeriga. Katseseadme valmimise järel lõi töö autor ka uuritud operatsioonivõimendi lülitustest näidiskatsed, millega autor tõestas, et eesmärgid saavutati ning katseseade töötab.

KASUTATUD ALLIKAD

- [1] Electronical Tutorials. (2021). [veebileht] https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_1.html. (11.01.2021).
- [2] **Kütt, L.** (2018). Analoo- ja digitaaltehnika. Tallinn: Tallinna tehnikaülikool. https://portal-int.taltech.ee/sites/default/files/2020-02/EE_ins_KOOND_ANALOOGDIGITAALTEHNIKA_20190517.pdf. (04.05.2021).
- [3] **Vodovozov, V., Jansikene, R.** (2006). Elektroonika ja jõupooljuhttehnika. <http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/IN660/ELEKTROONIKA%20ja%20jõupooljuhttehnika.pdf>. (15.01.2021).
- [4] All about circuits. (2021). Media Tech. [veebileht] <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-8/positive-feedback/>. (22.04.2021).
- [5] Arduino. (2018). [veebileht]. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. (20.04.2021).
- [6] Analog devices. (2011). [veebileht]. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8541_8542_8544.pdf. (29.04.2021).
- [7] **Lehtla, M.** (2002). Elektroonikaseadmete raalprojekteerimine. Infotrükk. Tallinna Tehnikaülikool: TTÜ elektriamite ja jõuelektroonika instituut. 121 lk.
- [8] Guide for I2C OLED Display with Arduino. (2021). RND blogi. [veebileht]. <https://randomnerdtutorials.com/guide-for-oled-display-with-arduino/>. (29.04.2021).
- [9] 3D Koda. (2021). 3D Printimine. [veebileht]. <https://3dkoda.com/3d-printimine/>. (19.05.2021).
- [10] Differencevs. (2021). Orgaaniline keemia 2021. Erinevus PLA ja ABS vahel. [veebileht]. <https://et.differencevs.com/6852365-difference-between-pla-and-abs#menu-2>. (19.05.2021).

LISAD

Lisa 1. Arduino Geekreit Uno arendusplaadi pinout.



Lisa 2. Arduino IDE-ga koostatud programmeerimiskood.

```
#include <Wire.h>

#include <Adafruit_GFX.h>

#include <Adafruit_SSD1306.h>


#define SCREEN_WIDTH 128 // OLED display width, in pixels
#define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED display height, in pixels


// Declaration for an SSD1306 display connected to I2C (SDA, SCL pins)
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, -1);


int sisend0 = 0;

int sisend1 = 1;

int sisend2 = 2;

int vaartus0 = 0;

int vaartus1 = 1;

int vaartus2 = 2;

float V0 = 0.0;

float V1 = 0.0;

float V2 = 0.0;
```



```

// void setupis oevad käsud täidetakse üks kord, siis kui seade tööle hakkab

void setup() {

    pinMode(sisend0, INPUT);

    pinMode(sisend1, INPUT);

    pinMode(sisend2, INPUT);


    Serial.begin(115200);


    if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {

        Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));

        for (;;)

    }

    delay(2000);

    display.clearDisplay();

    display.setTextColor(WHITE);

}

//void loobis olevaid käskse täidetakse järjest senikaua, kui seade töötab (voolu on)

void loop() {

    delay(2000); //tekitab tsüklite vahele 2 sekundilise pausi


    vaartus0 = analogRead(sisend0); //loeb sisendilt väärtuse

    vaartus1 = analogRead(sisend1);

    vaartus2 = analogRead(sisend2);

```

```
V0 = (vaartus0 * 5.0) / 1024.0; //teisendab loetud väärtuse voltideks
```

```
V1 = (vaartus1 * 5.0) / 1024.0;
```

```
V2 = (vaartus2 * 5.0) / 1024.0;
```

```
Serial.print("\t pinge on= "); // lihtsalt kontrolliks saadab välundi serial porti, et kui ekraan  
ei tööta, siis on ikka näha, et programm töötab
```

```
Serial.print(V0);
```

```
Serial.print(V1);
```

```
Serial.print(V2);
```

```
// Draw triangle
```

```
display.clearDisplay();
```

```
display.drawTriangle(30, 10, 90, 33, 30, 60, WHITE);
```

```
display.display();
```

```
delay(0);
```

```
//Saadab andmed ekraanile
```

```
display.setTextSize(1);
```

```
display.setCursor(0, 17);
```

```
display.print(V0);
```

```
display.print("V");
```

```
display.setCursor(0, 45);
```

```
display.print(V1);
```

```
display.print("V");
```

```
display.setCursor(95, 30);
```

```
display.print(V2);  
display.print("V");  
display.setCursor(35, 20);  
display.print("+");  
display.setCursor(35, 45);  
display.print("-");  
  
display.display();  
}
```

LIHTLITSENTS

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, _____ Stella Ploom _____,
(*autori nimi*)

sünniaeg 11.04.1999,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
_____ Arduinol põhinev õppevahend operatsioonivõimendite uurimiseks _____,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on _____ Heino Pihlap _____,
(*juhendaja(te) nimi*)

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____ Stella Ploom /allkirjastatud digitaalselt/ _____
(*allkiri*)

Tartu, _____ 27.05.2021 _____
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ Heino Pihlap /allkirjastatud digitaalselt/ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*)

_____ 27.05.2021 _____
(*kuupäev*)